

## DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TURBIDEZ ATMOSFÉRICA SOBRE LA PERFORMANCE DE COLECTORES SOLARES PLANOS

Enrique D. Albizzati

Facultad de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Litoral

Stgo. Del Estero 2654 - 3000 - Santa Fe Argentina - Fax: (0342) 4571162-E.mail: albizzati@fiquis.unl.edu.ar

### RESUMEN

Utilizando un modelo anisotrópico, se calcula la radiación sobre un colector plano que opera en condiciones típicas en Santa Fe, y se analiza el efecto de la turbidez atmosférica sobre las componentes directa y difusas. Luego se estima la radiación absorbida, los parámetros característicos, y la eficiencia del colector. El aumento de la turbidez produce importantes cambios en la radiación incidente, modificando la performance de los equipos. El decrecimiento de la eficiencia está entre 3,7% y 5,6%, según el modelo adoptado para calcular la radiación absorbida, siendo mínimo el valor si se supone que toda la radiación incide con el ángulo de la directa. Haciendo uso de los modelos más simples, en relación con el modelo referencial que contempla la radiación directa y la radiación circumsolar con igual ángulo de incidencia, se cometen errores medios absolutos entre 0,86 % y 2,03% (MBE) y entre 0,88% y 2,03% (RMSE).

### INTRODUCCIÓN

Para comparar la performance térmica y efectuar el dimensionamiento de las instalaciones de aprovechamiento de la energía solar, es necesario contar con dos parámetros característicos del colector solar plano: producto transmitancia-absorbancia y coeficiente de pérdidas de energía. Una alternativa es la determinación experimental, donde se agrupan con el denominado factor de remoción de calor, según las normas de la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 1977) y por el Instituto Argentino de Racionalización de los Materiales (IRAM, 1983).

Como los valores de las distintas componentes de la radiación influyen sobre la radiación absorbida resulta de interés la evaluación teórica de los parámetros característicos y de la eficiencia de los equipos en condiciones operativas que tomen en cuenta las diferentes contribuciones de todas las componentes de la radiación total. Es sabido que dicha contribución es variable, aún en condiciones de cielo sin nubosidad, en función del contenido de gases y aerosoles presentes en la atmósfera terrestre. El tamaño y cantidad de aerosoles (partículas de polvo y gotas de agua) varía por la contaminación ambiental y con las condiciones climáticas, e incide fuertemente sobre la radiación solar recibida (Albizzati et. al, 1997).

En este trabajo se computa en primer lugar la radiación solar incidente sobre el plano inclinado del colector en una condición típica para la ciudad de Santa Fe, Argentina. Bajo un cielo sin nubosidad y considerando distintos valores de la turbidez atmosférica, se analiza el efecto sobre la radiación solar total, directa y componentes de la difusa incidentes sobre el plano del colector, empleando el modelo anisotrópico de Hay y Davies (1978). Luego se procede a estimar la radiación solar absorbida por el equipo, utilizando cuatro modelos teóricos que difieren en el tratamiento dado a las componentes de la radiación difusa, y a evaluar sucesivamente los parámetros característicos y la eficiencia térmica del colector para las condiciones atmosféricas prefijadas usando un programa computacional (Albizzati, 1997). Finalmente se comparan los resultados obtenidos con los distintos modelos teóricos, analizando las discrepancias entre los mismos mediante elementos estadísticos.

### RADIACIÓN SOLAR

La evaluación de la radiación solar incidente sobre la superficie del colector solar en días de cielo claro se realiza en base al criterio de Bird y Riordan (1986). El modelo incluye el algoritmo de Hay y Davies (1978), que permite evaluar la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada a una dada longitud de onda, a partir de la correspondiente al plano horizontal. En el espectro solar la radiación solar total incidente ( $I_t$ ) se predice integrando los valores calculados en cada banda del mismo. La radiación solar absorbida ( $I_a$ ) por el colector puede estimarse a partir de las componentes de la radiación incidente y de los productos de la transmitancia-absorbancia asociados a la radiación directa (D), a la difusa isotrópica (i) y a la reflejada(r).

En este trabajo se utilizan cuatro modelos para efectuar el cálculo. El modelo más simple ( $M_1$ ) asume que el producto transmitancia-absorbancia del colector ( $\tau\alpha$ ), es igual al correspondiente a la componente directa de la radiación.

Otro modelo contempla que la radiación directa y la radiación circumsolar (C), poseen el referido producto transmitancia-absorbancia igual al de la radiación directa ( $M_2$ ). Por lo tanto la radiación solar absorbida es:

$$I_a = (I_D + I_C)(\tau\alpha)_D + I_i(\tau\alpha)_i + I_r(\tau\alpha)_r \quad (1)$$

El tercer modelo ( $M_3$ ) incluye el agrupamiento de la componente circumsolar con la componente isotrópica y considerando para estas componentes útil el producto transmitancia-absorbancia de la radiación isotrópica. Entonces:

$$I_a = I_D (\tau\alpha)_D + (I_i + I_C)(\tau\alpha)_i + I_r (\tau\alpha)_r \quad (2)$$

Un cuarto modelo ( $M_4$ ) se basa en el criterio propuesto por Duffie y Beckman (1991), e indica que el producto transmitancia-absorbancia del colector es el 96% del valor correspondiente al de la radiación directa.

Para calcular el producto transmitancia-absorbancia de la radiación directa, se tiene en cuenta el ángulo de incidencia de la radiación sobre el colector. De igual manera para la radiación isotrópica y la radiación reflejada se utiliza un ángulo efectivo de incidencia que depende de la inclinación del plano receptor. El procedimiento de cálculo para hallar el producto transmitancia-absorbancia de cada componente utiliza las dimensiones y propiedades de la cubierta transparente a la radiación, y las propiedades que corresponden a la superficie absorbente (Duffie y Beckman, 1991).

## COLECTOR PLANO

El estudio del efecto de las componentes de la radiación solar sobre la eficiencia térmica del colector plano toma como base un colector de tubos paralelos, de superficie no selectiva y cubierta de vidrio. Las dimensiones, materiales, y propiedades térmicas y ópticas relativas a la cubierta transparente, a la placa absorbente y a la aislación térmica resultan comunes en los colectores solares comerciales disponibles en el mercado. En el comportamiento de los colectores solares se considera su operación con convección forzada y en estado estacionario. Según el modelo, la energía solar que es aprovechada en el colector ( $Q_u$ ) se expresa mediante:

$$Q_u = F_R A_C [(\tau\alpha)I_t - U_L(T_e - T_a)] \quad (3)$$

En la ecuación aparecen el factor de remoción de calor ( $F_R$ ) y el coeficiente total de pérdidas de calor ( $U_L$ ). Además, el área neta de colección de la radiación ( $A_C$ ), la temperatura de entrada del fluido ( $T_e$ ), y la temperatura del ambiente ( $T_a$ ). La energía útil a su vez es igual al producto entre el caudal másico, el calor específico y la diferencia entre la temperatura de salida y la temperatura de entrada del fluido

La eficiencia térmica de los colectores solares ( $\eta$ ) es el cociente entre la energía útil y la radiación solar incidente sobre el plano del colector. Teniendo en cuenta la definición de la eficiencia térmica y de la energía útil absorbida con las ecuaciones planteadas, resulta:

$$\eta = F_R \left[ (\tau\alpha) - \frac{U_L(T_e - T_a)}{I_t} \right] \quad (4)$$

El programa de computación aplicado en primer lugar halla el producto transmitancia-absorbancia efectivo del colector como el cociente entre la radiación absorbida y la radiación incidente. A continuación se resuelve el balance térmico en el colector solar, calculando el coeficiente de pérdidas de energía, la energía útil aprovechada y la eficiencia térmica en las condiciones de operación (Albizzati, 1997).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para hallar la radiación solar global incidente sobre el colector, el mismo se supone localizado en la ciudad de Santa Fe, Argentina (-31,65°S; 60,72°O) durante el 23 de marzo a la hora 13, posicionado el plano mirando hacia el norte geográfico, con un ángulo de inclinación igual a 30°, respecto del plano horizontal, y un ángulo cenital de 32,14°. Se ha considerado la reflectancia del suelo 0,20, y un conjunto de parámetros representativos del lugar y momento estudiados, en base a las características atmosféricas, y a distintos métodos o correlaciones existentes en la bibliografía para su estimación.

El valor del exponente correspondiente a la fórmula de Ångström, que varía según la distribución de tamaños de las partículas de aerosol es 1,3 (Iqbal, 1983). Tomando como base la propuesta de Bird y Riordan (1986), y los valores sugeridos por Gueymard (1989), se adoptaron los valores para el albedo del aerosol a 400 nm (0,815), su correspondiente factor de variación con la longitud de onda (0,095), y el factor de asimetría del aerosol (0,65). El valor del coeficiente  $\beta$  de turbidez adoptada va desde  $\beta=0,06$  (cielo muy claro) hasta  $\beta=0,18$  (cielo casi turbio), resultando según la fórmula de Ångström  $T=0,15$  y  $T=0,45$  respectivamente, la turbidez atmosférica a la longitud de onda 500 nm, parámetro con el cual se alimenta el modelo.

En la Figura 1 se observan los cálculos efectuados de las distintas componentes de la radiación solar sobre el plano inclinado del colector. Como era previsible la radiación total ( $I_t$ ) y la directa ( $I_D$ ) caen a medida que aumenta la turbidez atmosférica, mientras que las componentes circumsolar ( $I_C$ ) e isotrópica ( $I_i$ ) crecen significativamente y la componente reflejada por el suelo ( $I_r$ ) decrece en forma muy suave. La radiación directa constituye el 87% de la radiación total cuando la turbidez es mínima y el 76% cuando es máxima. La radiación total máxima es 1032 W/m<sup>2</sup> y este valor se reduce a 943 W/m<sup>2</sup> a considerar la atmósfera turbia. Con respecto a las componentes de la radiación difusa,  $I_c$  es el 8,7% de la radiación solar total y su valor es 90,1 W/m<sup>2</sup> si  $T=0,15$ ; cuando  $T=0,45$  vale 128 W/m<sup>2</sup>, y representa 13,6% de la radiación total incidente. La radiación isotrópica crece al aumentar la turbidez desde 35,9 W/m<sup>2</sup> (mínimo) hasta 89,9 W/m<sup>2</sup> (máximo) en el rango analizado, mientras que la radiación reflejada por el suelo decrece entre 10,4 y 9,8 W/m<sup>2</sup>.

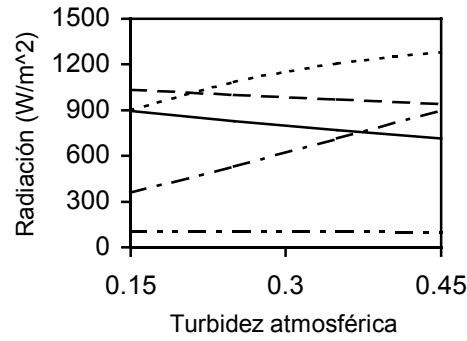


Figura 1. Radiación solar incidente sobre el colector en función del coeficiente de turbidez atmosférica ( $I_r$  ———,  $I_D$  - - - - - ,  $I_C.10$  . . . . . ,  $I_i.10$  - . - . - . ,  $I_r.10$  - - - - -).

Los cambios que se producen en el valor de las componentes de la radiación solar al variar la turbidez atmosférica afectan la radiación solar absorbida por el colector y la eficiencia térmica del mismo. En las condiciones elegidas el ángulo de incidencia de la radiación directa es  $3,25^\circ$ , mientras que los ángulos de incidencia efectivos de la radiación isotrópica y reflejada son  $56,88^\circ$  y  $75,06^\circ$ , respectivamente. Con el procedimiento descrito se obtienen los siguientes resultados para el producto transmitancia-absorbancia correspondiente a las componentes directa (0,802), isotrópica (0,716), y reflejada (0,425). En los cálculos se emplean absorbancias de la placa variables según el ángulo de incidencia efectivo: 0,90 para la radiación directa, 0,854 para la radiación isotrópica, y 0,684 para la radiación reflejada.

T	$(\tau\alpha)$				$\eta$			
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
0,15	0,802	0,795	0,787	0,770	0,517	0,511	0,504	0,489
0,25	0,802	0,793	0,784	0,770	0,511	0,503	0,495	0,482
0,35	0,802	0,792	0,780	0,770	0,505	0,496	0,485	0,476
0,45	0,802	0,790	0,777	0,770	0,498	0,487	0,476	0,469

Tabla 1. Producto transmitancia-absorbancia y eficiencia térmica del colector.

Los cálculos efectuados con el programa se observan en la Tabla 1. Para valores típicos de turbidez se han hallado el producto transmitancia-absorbancia efectivo del colector y la eficiencia térmica correspondiente a las condiciones operativas y ambientales fijadas, haciendo uso de los diferentes modelos propuestos para estimar la energía solar absorbida por unidad de superficie colectora. El fluido que utiliza el colector es agua, que se supone ingresa a la temperatura  $T_e=60^\circ\text{C}$  y con una velocidad promedio en los tubos de 3 cm/s. Tal como está dicho la temperatura del ambiente es  $T_a=23^\circ\text{C}$ , y la velocidad del viento es 1,5 m/s. Debe hacerse notar que en los cálculos prácticamente no se observaron modificaciones en el valor del factor de remoción de calor del colector solar ( $F_R=0,911$ ). Asimismo, el coeficiente de pérdidas de calor desde la placa y el coeficiente de pérdidas de calor del colector variaron muy poco. El primero, tiene valores que oscilaron entre 5,47 y 5,50  $\text{W/m}^2\text{K}$ . El coeficiente total de pérdidas del colector presenta un valor máximo de 6,53  $\text{W/m}^2\text{K}$ , y el mínimo de 6,50  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

En la tabla se muestra que tanto el producto transmitancia-absorbancia como la eficiencia térmica son máximos para el modelo  $M_1$  y disminuyen regularmente hasta el modelo  $M_4$ . Además el producto decrece a medida que aumenta la turbidez atmosférica, cuando su valor depende de la cantidad de radiación directa y difusa (modelos  $M_2$  y  $M_3$ ); se verifica que esta reducción es menos brusca en el modelo que contempla el agrupamiento de la componente directa con la circumsolar (solo 0,63%), y en cambio si dicha componente se agrupa con la isotrópica es casi del 1,3%. Resultan más significativas las variaciones de la eficiencia térmica del colector. Al aumentar la turbidez de la atmósfera la eficiencia se reduce un 5,6% en el modelo  $M_3$  y en porcentajes decrecientes en los modelos  $M_2$  (4,7%),  $M_4$  (4,1%) y  $M_1$  (3,7%). Ello se explica porque cuando se contempla una menor contribución de la radiación directa disminuye la eficiencia térmica, pero esta disminución es mínima al asumir que toda la radiación incide sobre el colector con un ángulo igual al de la componente directa.

Los resultados obtenidos en la comparación de la performance térmica del colector solar, considerando los distintos modelos teóricos propuestos para estimar la radiación solar absorbida, se resumen en las Tablas 2 y 3. En el producto transmitancia-absorbancia el error porcentual promedio es 1,20 para el modelo simple  $M_1$ , mientras que dicho error es -1,33 y -2,84 para los modelos  $M_3$  y  $M_4$ , respectivamente. Además, los errores medios MBE (mean bias error) y RMSE (root mean square error) del producto son muy próximos entre sí, en valores absolutos, y muestran una tendencia semejante a la encontrada en el error porcentual promedio.

T	$(\tau\alpha)$			$\eta$		
	M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
	0,88	-1,01	-3,14	1,17	-1,37	-4,31
0,25	1,13	-1,13	-2,90	1,59	-1,59	-4,17
0,35	1,26	-1,52	-2,78	1,81	-2,22	-4,03
0,45	1,52	-1,65	-2,53	2,26	-2,26	-3,70

Tabla 2. Error porcentual del producto transmitancia-absorbancia y de la eficiencia térmica del colector.

Error	$(\tau\alpha)$			$\eta$		
	M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
MBE	0,0095	-0,0105	-0,0225	0,0086	-0,0093	-0,0203
RMSE	0,0097	0,0107	0,0226	0,0088	0,0094	0,0203

Tabla 3. Errores medios del producto transmitancia-absorbancia y de la eficiencia térmica del colector.

Los errores porcentuales hallados para la eficiencia térmica del colector son más significativos que para el referido producto, y a medida que crece la turbidez atmosférica se aproximan los valores absolutos de este error. El error porcentual absoluto promedio es máximo e igual a 4,05 para el modelo M<sub>4</sub>, vale 1,73 para el modelo M<sub>1</sub> y 1,86 para el modelo M<sub>3</sub>. Los errores medios de la eficiencia presentan similitud con los correspondientes al producto transmitancia-absorbancia efectivo, aunque son levemente inferiores en valor absoluto.

## CONCLUSIONES

El modelo anisotrópico para evaluar la radiación solar incidente sobre los colectores permite computar el aporte de cada una de las componentes de la radiación al valor de la radiación total, y los efectos producidos por la turbidez atmosférica. El aumento de la turbidez desde 0,15 hasta 0,45 da lugar a modificaciones en la contribución de las distintos componentes y a una disminución marcada de la radiación total incidente (8,7%); a medida que disminuyen los aportes de las componentes directa y reflejada, crecen los que corresponden a las componentes circumsolar e isotrópica.

Además se verifican cambios en la performance térmica del equipo solar, aunque al evaluar los parámetros característicos se comprueba que el coeficiente total de pérdidas permanece prácticamente invariable, al igual que el factor de remoción de calor del colector. El producto transmitancia absorbancia efectivo decrece al aumentar la turbidez cuando el modelo de cálculo contempla su dependencia con la radiación directa y difusa. Esta disminución es mínima cuando el modelo considera la componente circumsolar con un ángulo de incidencia igual al de la radiación directa. Las variaciones que se producen en la eficiencia térmica son relativamente más importantes. El decrecimiento está entre 3,7% y 5,6% según el modelo adoptado de cálculo, siendo mínimo el valor si se supone que toda la radiación incide con un ángulo igual a la radiación directa.

Al comparar las predicciones de los modelos, tomando como referencia el que contempla que el ángulo de incidencia es el mismo para la radiación directa y la circumsolar, se comete un error porcentual mínimo absoluto igual a 0,88 para el producto transmitancia absorbancia y 1,17 para la eficiencia, mientras que el error porcentual máximo absoluto es 3,14 y 4,31 respectivamente. En lo relativo a los errores medios absolutos, el MBE máximo es 0,0225 y el mínimo es 0,0095 para el citado producto, y valen 0,0203 y 0,0086 para la eficiencia térmica. RMSE tiene valores muy próximos a los anteriores aunque algo superiores.

## REFERENCIAS

- Albizzati E. (1997), Funcionamiento de colectores solares planos: predicción de la radiación incidente y efecto de las variables de operación, *Información Tecnológica*, Vol.8, N° 1, pp. 81-87.
- Albizzati E., Rossetti G., and Alfano O. (1997), Measurements and predictions of solar radiation incident on horizontal Santa Fe, Argentina (31°39'S, 60°43'W), *Renewable Energy*, Vol. 11, N°4, p. 469-478.
- ASHRAE (1977), Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, Standard 93-77, American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers.
- Bird R. E., and Riordan C. (1986), Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 25, pp. 87-97.
- Duffie J. A., and Beckman W. A. (1991), *Solar engineering of thermal processes*, 2<sup>nd</sup> Ed., J. Wiley.
- Gueymard C. (1978), A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface, *Solar Energy*, Vol. 43, pp.253- 265.
- Hay J. E., and Davies J. A. (1978), Calculation of the solar radiation incident on inclined surface, in *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Toronto, Ontario, Canadá.
- Iqbal M. (1983), *An introduction to solar radiation*, Academic Press.
- IRAM (1983), Colectores solares. Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico, Norma No.210002, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.